

*Análisis de las
disponibilidades hídricas
en las cuencas
hidrográficas de la
comunidad de Madrid:
situación actual y
previsiones futuras*

Rosa Cañada Torrecilla
rosa.canada@uam.es

Encarna Galán Gallego
encarna.galan@uam.es

Felipe Fernández García
felipe.fernandez@uam.es

ANÁLISIS DE LAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS EN LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE LA COMUNIDAD DE MADRID: SITUACIÓN ACTUAL Y PREVISIONES FUTURAS

Rosa Cañada Torrecilla
Encarna Galán Gallego
Felipe Fernández García

RESUMEN: El objetivo fundamental del trabajo es la modelización espacio-temporal de las disponibilidades hídricas anuales en diferentes subcuencas hidrográficas del Tajo, tanto en el momento actual como en diferentes escenarios de cambio climático, a través de la aplicación de un SIG. Como punto de partida se aborda el análisis de las entradas (precipitación) y salidas (ETP) del ciclo hidrológico, a fin de determinar la lluvia útil. La información generada en esta primera fase de la investigación se integra en el Sistema de Información Geográfica y, mediante la aplicación de técnicas geoestadísticas y de análisis espacial, se realiza el modelado de la precipitación útil en la Comunidad de Madrid y áreas circundantes.

PALABRAS CLAVE: disponibilidades hídricas, subcuencas hidrográficas del Tajo, cambio climático, modelado espacial y temporal, Comunidad de Madrid.

ABSTRACT: The fundamental aim of this work is the spatial and temporal modelling of the water availability in different subcatchments of the Tajo River at present and in different climate change scenarios through the implementation of a GIS. The starting point is an analysis of inputs (precipitation) and outputs (PET) of the hydrologic cycle, in order to determine the useful rain. The information generated in this first phase of research will be integrated into the Geographic Information System. The modelling of water availability in Madrid was achieved by applying geostatistical techniques and spatial analyses.

KEYWORDS: water availabilities, Tajo watersheds, climate change, spatial and temporal modelling, Community of Madrid.

1. Introducción

El calentamiento global es un hecho incuestionable que provocará cambios en la distribución espacial y temporal de las precipitaciones y consecuentemente afectará

de manera adversa a los recursos hídricos (Cañada, 2007). En España, tal como se ha puesto de manifiesto en diversos estudios a escala peninsular y regional, la temperatura del aire ha mostrado indudables signos de calentamiento en el conjunto del período

instrumental, siendo la tasa de calentamiento superior al promedio mundial y al europeo. Este incremento se hace especialmente significativo a partir de la década de los setenta (Brunet *et al.*, 2007; Fernández García, 2007; Martín Vide *et al.*, 2005). Para el caso concreto de la Meseta Meridional, donde se inserta nuestra zona, el análisis de las variaciones y tendencias observadas en la serie regional de las temperaturas máxima y mínima media anual durante el siglo XX muestra como resultados más relevantes: 1º) Elevación tanto de las temperaturas máximas como de las mínimas, si bien ésta es más acusada y significativa en las máximas (el incremento térmico experimentado durante el citado periodo por las temperaturas diurnas se cifra en 0,71 °C); 2º) La evolución temporal muestra fases paralelas a las planetarias, estando caracterizada la del tramo final (1972/73-1996) por un significativo aumento tanto en las temperaturas máximas como en las mínimas, de 1,62 °C y 1,49 °C respectivamente (Galán *et al.*, 2001). Resultados similares se obtuvieron sobre 7 observatorios de primer orden de la región (Cañada *et al.*, 2001).

Las proyecciones del clima futuro, recogidas en el último Informe del IPCC, muestran como la Cuenca Mediterránea será una de las regiones que, en mayor medida, sufrirá los efectos negativos del Cambio Climático (IPCC, 2007). Circunscribiéndonos a la Península Ibérica, ésta se calentará a lo largo del siglo XXI a razón de 0,4 °C/década en invierno y 0,7 °C/década en verano, en el escenario A2 y 0,4 °C/década en invierno y 0,6 °C/década en verano en el escenario B2. El calentamiento será mayor en el interior de la Península, con incrementos de 5 °C a 7 °C en verano y de 3 °C a 4 °C en invierno (Castro *et al.*, 2005). Respecto a las precipitaciones, cabe señalar que, si bien las tendencias de cambio no son uniformes, todos los modelos coinciden en

una reducción significativa de los totales anuales con el tiempo. Dichas reducciones son máximas en primavera y, asimismo, más acusadas en el escenario A2 que en B2 (Castro *et al.*, *opus cit.*). Por otro lado, junto a este descenso de las precipitaciones, se prevé un aumento en la frecuencia, duración e intensidad de las sequías, riesgo climático con especial incidencia en la Península Ibérica, en general, y en la Meseta Meridional, en particular, puesto que esta región es uno de los espacios peninsulares que, con mayor frecuencia y, efectos más negativos, padece secuencias secas (Galán, 2004)

Los cambios producidos en estos elementos climáticos afectarán a otras variables del ciclo hidrológico, como la escorrentía o la recarga de acuíferos, lo que causará una disminución de las disponibilidades de agua y un aumento de la demanda en los sistemas de regadío, en el futuro. En la Comunidad de Madrid las aguas subterráneas suponen un tercio de los recursos hídricos totales (Alcolea y García, 2006).

En la *Evaluación Preliminar General de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático* (MIMAN, 2005), siguiendo las investigaciones de Ayala e Iglesias (Ayala-Carcedo *et al.*, 2001), se estimó que para el 2060, simulaciones con aumentos de temperatura de 2,5 °C y disminuciones de precipitación de un 8%, producirían una reducción global media de los recursos hídricos de un 17% y podrían superar el 20% o el 22% para los escenarios previstos para final de siglo XXI.

En el libro *Blanco de Agua en España* (MIMAM, 2000) bajo una hipótesis de duplicación del CO₂ para 2030, con un aumento de temperatura de 1 °C y una disminución de un 5% de la precipitación anual, se estimó una disminución media de las aportaciones hídricas entre el 5% y el 14%. El estudio del CEDEX (1998) utilizando el modelo SIMPA obtuvo resultados similares.

En el futuro la falta de recursos hídricos afectará a muchos sistemas naturales y al bienestar humano. Se producirán cambios en la oferta y en la demanda de agua, cambios en las oportunidades para utilizar el medio ambiente con fines de recreación y turismo, cambios en la pérdida de bienes y vidas a causa de fenómenos hidrológicos extremos, etc. Los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos podrán influir en las perspectivas del desarrollo sostenible y podrán ampliar las desigualdades existentes (Lamela *et al.*, 2006, 2007).

Nuestro trabajo pretende contribuir a mejorar la ordenación y planificación del medio ambiente hídrico en la Comunidad de Madrid, un territorio muy densamente poblado, 6.081.689 habitantes en 2001 (IE, 2009), y por lo tanto, muy vulnerable, con una intensa urbanización y con una gran demanda de agua para abastecimiento urbano.

2. Datos y metodología

La investigación se inicia con la selección del área objeto de estudio y recopilación de la información climática sobre la que, posteriormente, se realizará el tratamiento estadístico y cartográfico.

A) *Zona de Estudio*. La cuenca hidrográfica de la comunidad de Madrid se inserta casi en su totalidad en la cuenca del Tajo (7.983 Km²), solamente los arroyos existentes en la ladera norte del Puerto de Somosierra, pertenecen a la cuenca del Duero, aunque su extensión e importancia es muy limitada. La superficie de la Comunidad de Madrid es muy pequeña si la insertamos en la Cuenca del Tajo (14,4%), los ríos, arroyos, discurren desde la Sierra en una dirección norte-sur y desembocan en el Tajo, que atraviesa el límite sur y sureste de la Comunidad de Madrid (Alcolea y García, *opus cit.*).

Las cuencas seleccionadas para nuestro trabajo (Figura 1) son la del Alberche, con sus afluentes el Cofio (que nace en Ávila) y el Perales; la del Guadarrama con su afluente el Aulencia; la del Jarama con tres de sus afluentes, Lozoya, Guadalix y Manzanares; las del Henares y Tajuña cuyos ríos desembocan en el Jarama por su margen derecha y, por último, la cuenca del Tajo intermedio que corresponde al Tajo entre Bolarque y Aranjuez. Es una superficie muy extensa (Cuadro I), que comprende no sólo la Comunidad de Madrid, sino también territorios de las provincias limítrofes, Ávila, Toledo, Cuenca y Guadalajara.

Cuadro I. Superficie ocupada por las cuencas hidrográficas de la Comunidad de Madrid

Zonas	Superficie km ²
Alberche	4109
Guadarrama	1709
Jarama-Manzanares	4802
Henares	4136
Tajuña	2608
Tajo Medio	2781
Total	20145

Fuente: Confederación hidrográfica del Tajo.

B) *Fuentes de información (Base de datos)*. Dado que el análisis de la evolución temporal de las disponibilidades hídricas constituye uno de los objetivos específicos de la investigación, la base de datos manejada está integrada por dos tipos de información: los datos referidos al clima actual (datos observados), por un lado, y las proyecciones del clima futuro, por otro. En el primer caso, el número de observatorios objeto de análisis se sitúa en 95 y la información climática correspondiente a los mismos se ha tomado de las publicaciones del INM (*Valores normales de precipitación y temperatura del período internacional 1961-1990*) y del Sistema de Información Geográfico Agrario (SIGA), tal como detallamos más adelante.

Las proyecciones utilizadas proceden de la base de datos TYN SC 1.0 a la cual se puede acceder desde la dirección <http://www.cru.uea.ac.uk/>. Es un grid de una resolución espacial de 10 minutos con información mensual de 5 variables climáticas: temperatura media, amplitud térmica, precipitación, presión de vapor y nubosidad, para un periodo temporal desde 2001-2100.

Las simulaciones están basadas en los resultados de los modelos CGCM2 (Canadá), CSIRO (Australia), PCM (EEUU) y HadCM3 (Reino Unido) bajo los supuestos de cuatro escenarios de emisiones SRES (A1FI, A2, B2, B1) (MITCHELL *et al.*, 2004).

En esta investigación nos hemos circunscrito a los datos del modelo HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model versión 3), modelo acoplado atmósfera-océano, y a dos escenarios climáticos, A2 y B2. El número de nodos utilizado para nuestro ámbito de estudio ha sido 350 con información de temperatura y precipitación mensual.

C) *Método de estudio*. El procedimiento lógico seguido para alcanzar los objetivos previamente formulados podemos sintetizarlo en las siguientes fases:

1ª) Establecimiento de los regímenes medios mensuales y anuales de precipitación y temperatura en los dos períodos temporales contemplados en el estudio (2041-2070 y 2071-2100) y para los dos escenarios de emisiones considerados (A2 y B2).

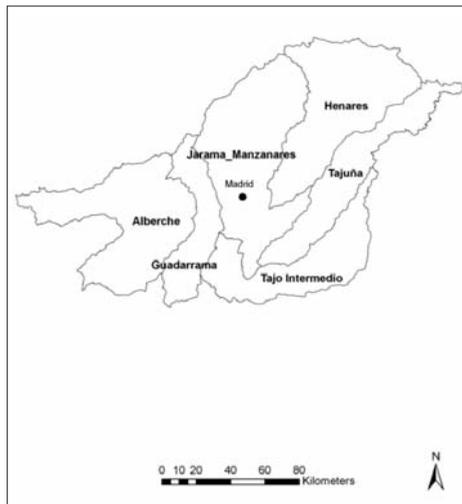


Fig. 1. Cuencas hidrográficas seleccionadas

2ª) Cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP), a escala mensual y anual. Este cometido se ha llevado a cabo ejecutando el programa “*Modelo de Balance Hídrico de Thornthwaite*”, software libre disponible en la dirección <http://www.usgs.gov/pubprod>. Las variables de entrada, requeridas por el modelo, son: temperatura, precipitación mensual y latitud del lugar. Para el cálculo de la ETP el programa tiene implementada la ecuación de Hamon (Hamon, 1961): $ETP = 13,97 \times d \times D^2 \times W_t$, donde ETP es la evapotranspiración potencial en mm de un mes determinado, d es el número de días del mes, D es el número de horas de luz al día y W_t es la densidad del vapor de agua saturado expresado en gr/m^3 , cuyo cálculo se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$W_t = \frac{4,95 \times e^{0,062 \times T}}{100}$$

donde T es la temperatura media mensual ((McCabe y Markstrom, 2007).

Mediante este procedimiento se obtuvo la ETP para los 350 puntos de la rejilla, en cada uno de los escenarios de cambio climático con los que se trabaja. De igual forma, se calculó el valor de ETP en 62 estaciones meteorológicas a partir de los promedios térmicos correspondientes al período 1961-90, suministrados por el INM. Posteriormente, y con la finalidad de conseguir la más amplia cobertura espacial de cara a la modelización de la precipitación útil, se incluyeron otros 33 observatorios con sus respectivos valores anuales de precipitación y ETP, elaborados, en este caso, por el Sistema de Información Geográfico Agrario (SIGA) del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. En total, pues, el número de observatorios utilizados en el análisis espacial de las disponibilidades hídricas actuales se elevó a 95.

3ª) Determinación de la lluvia útil, definida como la diferencia entre la precipitación (P) y

la evapotranspiración potencial (ETP). En el presente trabajo, que constituye una primera aproximación al estudio de los recursos hídricos en nuestra Comunidad, hemos optado por considerar únicamente la ETP, si bien está en fase de realización un análisis más ajustado y completo de las aportaciones hídricas utilizando la evapotranspiración real (ETR), procedimiento seguido en algunos de los estudios anteriormente citados (MIMAM, *opus cit.*).

4ª) Modelización espacial y temporal de la precipitación útil anual, mediante la aplicación de técnicas geoestadísticas y de análisis espacial implementadas en un Sistema de Información Geográfica. Para ello, utilizamos la extensión *Spatial Analyst* del programa ArcGIS 9.3., realizándose dicho modelado tanto para los datos proyectados, en los diferentes supuestos, como para los observados. De este modo, pueden establecerse las pertinentes comparaciones entre la situación actual de los recursos hídricos en la Comunidad de Madrid y la prevista para finales del siglo XXI, en función de la posible evolución temporal de los mismos. La modelización de las variables climáticas ha sido ensayada por el grupo de Climatología de la UAM en diferentes trabajos (Fernández y Galán, 1993; Fernández *et al.*, 1996) y, en particular, la aplicación del análisis espacial implementada en el programa ArcGIS (Fernández, 2005).

El método utilizado en la interpolación ha sido el kriging ordinario, cuya fórmula es $\hat{Z}(S_o) = \sum_{s \in \mathcal{A}} \lambda_s Z(s)$, donde $\hat{Z}(S_o)$ es el valor pronosticado de un lugar, λ_s es un peso desconocido que tenemos que calcular para cada valor observado y $Z(s)$ es el valor observado de un lugar (Cañada, 2007). Para disminuir la influencia de puntos lejanos en el proceso de interpolación y dada la marcada diferencia existente entre los registros del sector serrano y el resto de la Comunidad, consideramos, tras diversas

pruebas, que el número de datos a interpolar fueran 6. El modelo seleccionado ha sido el esférico porque es el que mejor se ajustaba a los datos de partida.

En la interpolación utilizamos información de 350 puntos de rejilla aunque a la hora recortar la superficie interpolada por la cobertura geográfica de las cuencas hidrográficas los puntos se redujeron a 78.

Análisis y discusión de los resultados

3.1. Disponibilidades hídricas actuales

El promedio regional de precipitación útil, resultado de la interpolación, evidencia el déficit hídrico “estructural” que, en términos generales, padece la Comunidad madrileña y áreas circundantes. No obstante,

este valor medio enmascara grandes diferencias espaciales, reflejadas en unos valores extremos que oscilan entre los + 902 y -451 mm (Cuadro II).

La variabilidad espacial de la lluvia útil, estrechamente ligada a la propia variabilidad de las precipitaciones y de la ETP, constituye, sin duda, uno de los rasgos más característicos de la zona. Como puede apreciarse en la figura 2, la distribución espacial de esta variable sigue, a grandes rasgos, la disposición de las grandes unidades de relieve, poniendo claramente de manifiesto el papel fundamental que este factor geográfico desempeña en el reparto espacial de los elementos climáticos. En efecto, la influencia de la altura queda patente en un aumento de las precipitaciones y en un descenso de las temperaturas (y, por consiguiente, de la ETP), determinando así que la cantidad de agua útil varíe de manera acusada entre las altas cumbres serranas, la

Cuadro II. Disponibilidades hídricas actuales.

Estadísticos Descriptivos	1961-1990
Media	-133'
Desviación Típica	221
Máximo	902
Mínimo	-451

rampa de la sierra y los páramos y campiñas (Fernández García, 1975; Fernández García *et al.*, *opus cit.*)

La referida figura 2 muestra claramente el dominio de las condiciones de aridez en un extenso sector de nuestra Comunidad, quedando localizadas las zonas con excedente hídrico en las elevadas cumbres del Sistema Central y en sus alrededores. El Cuadro III, corrobora este aspecto y nos permite cuantificar las variaciones espaciales de las disponibilidades hídricas a las que hemos hecho mención. Así,

podemos observar cómo el área deficitaria, con lluvia útil inferior a 0 mm, comprende el 75% del territorio; el 25% restante presenta un balance de agua positivo. La superficie con superávit hídrico se va reduciendo progresivamente a medida que aumenta el intervalo: el área con lluvia útil hasta 400 mm representa el 21%, mientras que sólo el 1% del territorio registra valores superiores a los 600 mm; el máximo excedente se localiza en torno a Navacerrada con 902 mm de precipitación útil.

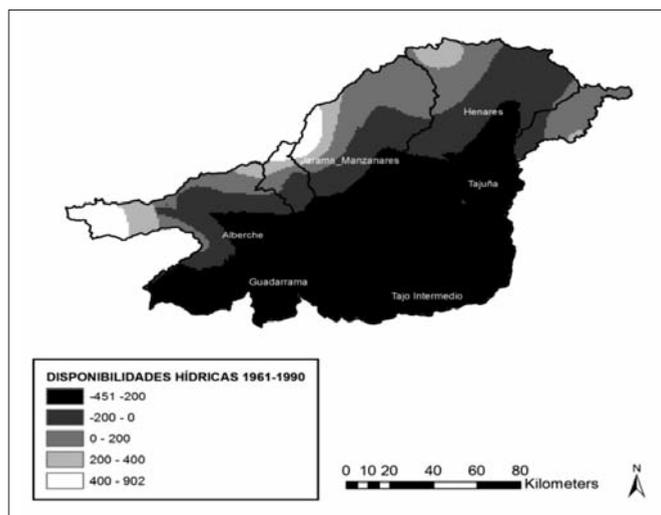


Figura 2. Disponibilidades hídricas actuales.

Cuadro III. Superficie ocupada por la lluvia útil en la actualidad.

Precipitación útil (mm)	Nº de píxeles	%
-451- -200	10.667	52,9
-200- 0	4.563	22,6
0- 200	3.284	16,3
200- 400	929	4,7
400- 902 (*)	707	3,5
(*) El 2,5% del territorio comprendido entre 400-600 mm. Sólo el 1% se sitúa entre los 600 y el máximo valor (902 mm)		

3.2. Disponibilidades hídricas en futuros escenarios de cambio climático

El aumento térmico previsto determinará una elevación de la evapotranspiración potencial y, ello, unido al descenso de las precipitaciones, se traducirá en una reducción progresiva de las disponibilidades hídricas a lo largo del presente siglo, aunque la magnitud del déficit hídrico difiere notablemente de uno a otro escenario (Cuadro IV, figuras 3 a 6).

Al comparar las medias de ambos escenarios, observamos que son mucho más extremas en el escenario A2 que en el B2, y superiores a finales de siglo que a mediados. Por ejemplo para el escenario A2 el promedio pasa de -536 mm a -916 mm a finales de siglo, y para el escenario B2, de -498 a -654 mm. También aumenta la variabilidad espacial entre periodos (cuadro IV).

Cuadro IV. Disponibilidades hídricas (mm) proyectadas según escenarios y horizontes temporales.

Estadísticos descriptivos	MODELO HADCM3			
	Escenario A2		Escenario B2	
	2041-2070	2071-2100	2041-2070	2071-2100
Media	-536	-916	-498	-654
Desviación Típica	213	247	208	226
Máximo	-3,4	-226	64	43
Mínimo	-905	-1284	-841	-1001

En cuanto a la distribución espacial, el aspecto más destacado en el escenario A2 es que las condiciones de déficit hídrico se hacen extensible a todo el territorio en el horizonte 2041-2070. Como puede observarse en el mapa correspondiente, toda la superficie muestra registros negativos de precipitación útil. En el 80% del territorio, aproximadamente, el déficit de agua alcanza valores entre 200 y 800 mm, profundizándose aún más este déficit en el extremo SO (precipitación útil < -800 mm).

Condiciones menos desfavorables se observan en diversos sectores de la sierra de Guadarrama y Gredos (7% del territorio), con déficits menos intensos (Fig. 3, Cuadro Va).

La falta de agua se acentúa con el paso del tiempo y, en el 2071-2100, el 45,7% del territorio supera los 1.000 mm de déficit hídrico (Fig. 4), los valores con respecto al primer periodo aumentan en todas las regiones (Cuadro Vb).

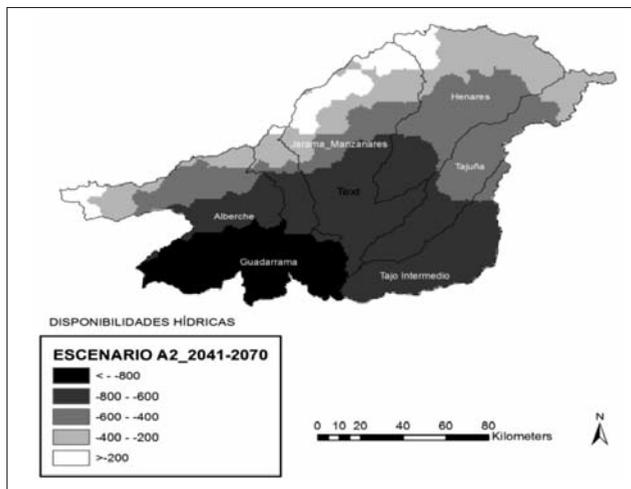


Fig. 3. Disponibilidades hídricas escenario A2 2041-2070.

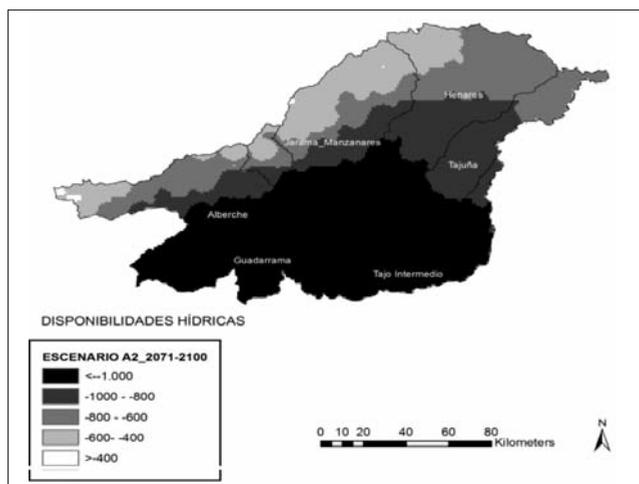


Fig. 4. Disponibilidades hídricas escenario A2 2071-2100.

El escenario B2 es menos extremo que el A2 desde el punto de vista de los recursos hídricos. De hecho existen algunas zonas en torno a Navacerrada (son insignificantes, apenas representan el 0,005% de superficie) donde no hay déficit hídrico, con unos valores máximos de lluvia útil de 64 mm para el periodo 2041-2070 y de 43 mm para 2071-2100 (Cuadro IV, Cuadro Vc y Vd).

Durante 2041-2070 no existe ningún sector por debajo de -841 mm de lluvia útil.

El 34% del territorio está comprendido entre 0 y -400 mm y el 66% entre -400 y -841 mm (Fig. 5, Cuadro Vc).

En la última treintena del siglo XXI se acentúa el estrés hídrico. La superficie con un déficit superior a 800 mm representa el 34%, alcanzándose valores máximos de 1001 mm (Cuadro IV). Entre -800 y -200 mm de precipitación útil se encuentra el 63% de la superficie y solamente hay un 4% con déficit inferior a 200 mm (Fig. 6, Cuadro Vd).

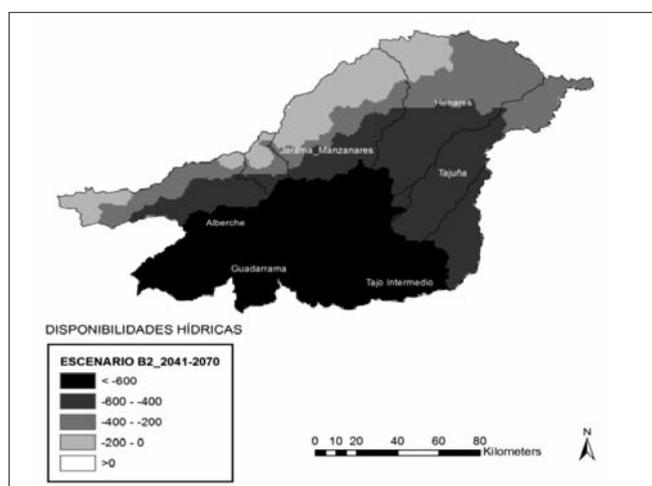


Fig. 5. Disponibilidades hídricas escenario B2 2041-2070.

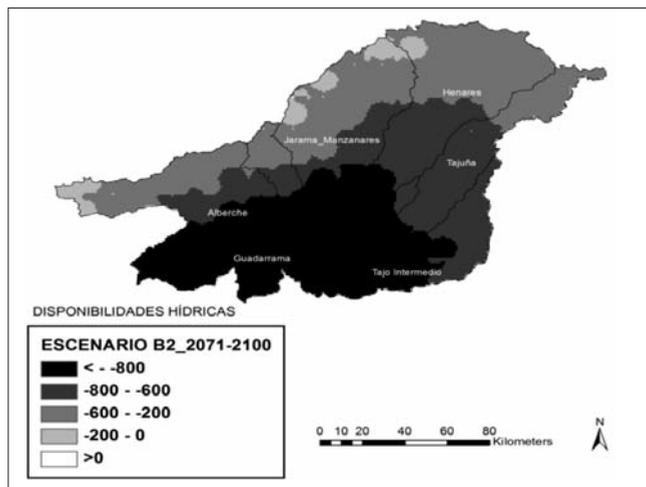


Fig. 6. Disponibilidades hídricas escenario B2 2071-2100.

Cuadro V. Superficie cubierta por la lluvia útil según proyecciones futuras.

a. Escenario A2. Horizonte 2041-2070

mm	Nº de píxeles	%
< -800	2869	14,2
-800- -600	7163	35,5
-600- -400	4899	24,3
-400- -200	3753	18,7
> -200	1466	7,3

b. Escenario A2. Horizonte 2071-2100

mm	Nº de píxeles	%
< -1000	9202	45,7
-1000- -800	4004	19,9
-800- -600	4126	20,5
-600- -400	2767	13,7
> -400	51	0,2

c. Escenario B2. Horizonte 2041-2070

mm	Nº de píxeles	%
< -600	7571	37,6
-600- -400	5829	28,9
-400- -200	4528	22,5
-200 - 0	2221	11
> 0	1	0,005

c. Escenario B2. Horizonte 2071-2100

mm	Nº de píxeles	%
< -800	6777	33,6
-800- -600	5682	28,2
-600- -200	6930	34,4
-200 - 0	760	3,8
> 0	1	0,005

3.3. Diferencias entre las disponibilidades hídricas actuales y futuras

3.3.1. Diferencias entre los dos horizontes temporales en ambos escenarios

Las diferencias en los promedios, siempre negativas, se sitúan en 353 mm para el A2 y 156 mm para el B2, lo que

representa una reducción en la precipitación útil del 63% y 31%, respectivamente, entre ambos periodos (Cuadro VI).

Espacialmente, las máximas reducciones se elevan hasta los 416 mm en el escenario A2 y 202 mm en el B2, mientras que las mínimas reducciones oscilan entre los 220 mm y los 16 mm en los mismos escenarios.

Cuadro VI. Estadísticos descriptivos de las diferencias de precipitación útil entre los dos horizontes temporales (2071-2100/2041-2070) en ambos escenarios.

Estadísticos descriptivos	Diferencias entre períodos temporales	
	Escenario A2	Escenario B2
Media	-353	-156,3
Desviación Típica	41,2	28,6
Máximo	-220,0	-16,0
Mínimo	-416	-201,7

La distribución espacial de las diferencias entre ambos periodos en el escenario A2, muestra reducciones máximas en un amplio sector que abarca la parte centro meridional de las diferentes cuencas hidrográficas, con valores por encima de los 350 mm.

En el extremo opuesto se encuentra el sector del Sistema Central (Somosierra, Guadarrama y Gredos), con una clara

orientación NE-SO, con descensos menos acusados, inferiores a 300 mm (Fig. 7).

Respecto al escenario B2, las diferencias entre mediados y finales de siglo XXI son más reducidas que en el escenario A2, presentado idéntico comportamiento espacial. Las mayores diferencias entre periodos están entre los 150 y 200 mm, y las menores, por debajo de 100 mm (Fig. 8).

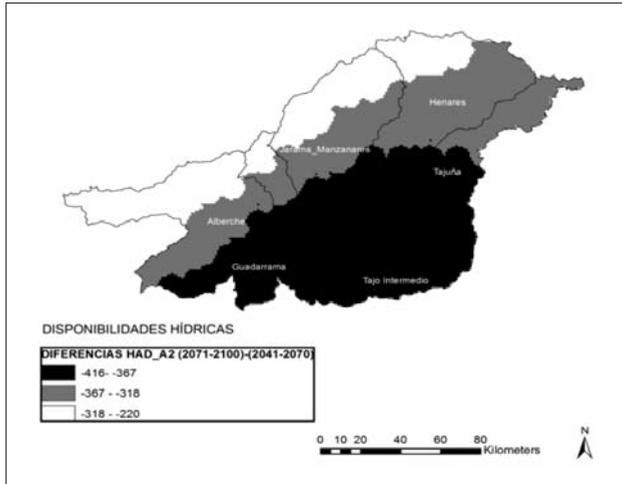


Fig. 7. Diferencias en las disponibilidades hídricas en el escenario A2 entre 2071-2100/2041-2070.

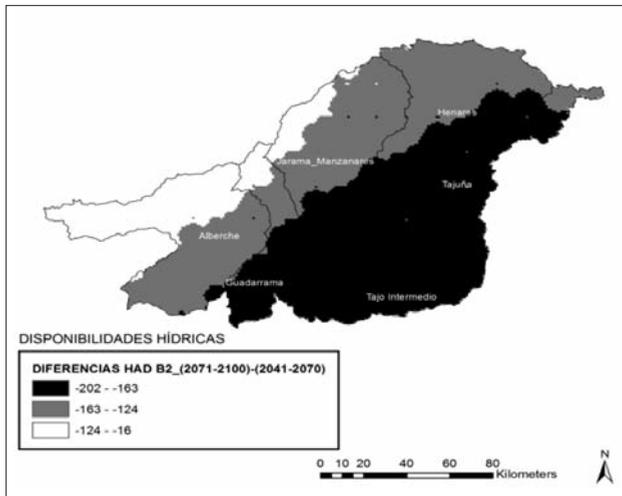


Fig. 8. Diferencias en las disponibilidades hídricas en el escenario B2 entre 2071-2100/2041-2070.

3.3.2. *Diferencias en la lluvia útil entre la situación actual y la proyectada para el último tercio del siglo XXI*

El aumento del déficit en el último tercio del siglo XXI, respecto a la situación actual, se multiplica por siete en el escenario A2 (el promedio espacial de precipitación útil pasa de -133 a -916 mm) y por cinco, en el

escenario B2 (el promedio de precipitación útil pasa de -133 a -654 mm).

Las reducciones máximas de la precipitación útil se sitúan en 1347 mm en el escenario A2 y 1104 mm en el escenario B2 y las reducciones mínimas en 492 mm en el A2 y 261 mm en el B2 (Cuadro VII).

Cuadro VII. Estadísticos descriptivos de las diferencias entre valores actuales de precipitación útil (mm) y los proyectados para los escenarios A2 y B2 (horizonte temporal: 2071-2100).

Estadísticos descriptivos	Diferencias con A2	Diferencias con B2
Media	-782,8	-520,8
Desviación Típica	122,9	111,2
Máximo	-491,8	-260,9
Mínimo	-1.346,9	-1.104,0

Desde el punto de vista espacial en el escenario A2 las diferencias superiores a 1000 mm se localizan en puntos aislados del extremo suroeste de la cuenca del Alberche y en puntos aislados del Sistema Central, que representan un 4% del territorio. Descensos entre 800 mm y 1000 mm se registran en un amplio sector de la zona meridional, con una superficie del 39%. La mayor parte del territorio, el 50%, presenta reducciones comprendidas entre 600 y 800 mm. Las menores pérdidas, inferiores a 600 mm, aparecen en algunos sectores muy localizados de las cuencas altas del Henares

y Manzanares, donde cubren una extensión del 7% (Fig. 9).

En el escenario B2 el reparto espacial de las diferencias adquiere una disposición similar al escenario A2, si bien la magnitud de los valores es inferior. Más de la mitad del territorio, el 67,4% registra reducciones entre los 400 y los 600 mm (Fig. 10). Las reducciones más bajas, con valores inferiores a 400 mm, ocupan el 13,3% del territorio, que igual que en el escenario A2, abarcan las cuencas altas del Henares, del Manzanares y la cuenca media del Tajuña.

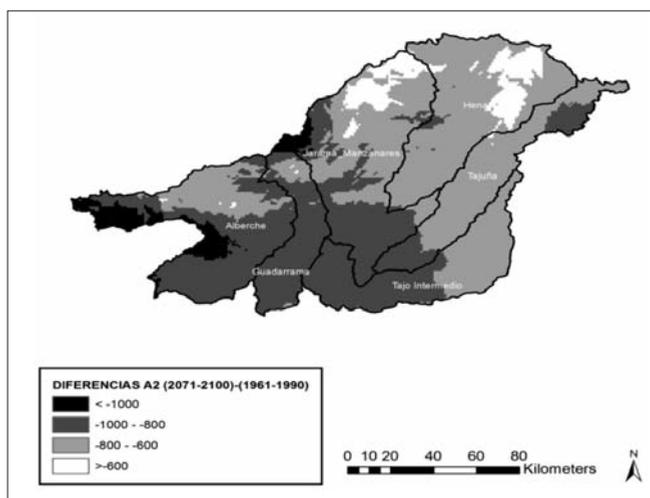


Fig. 9. Diferencias entre la situación actual y el escenario A2.

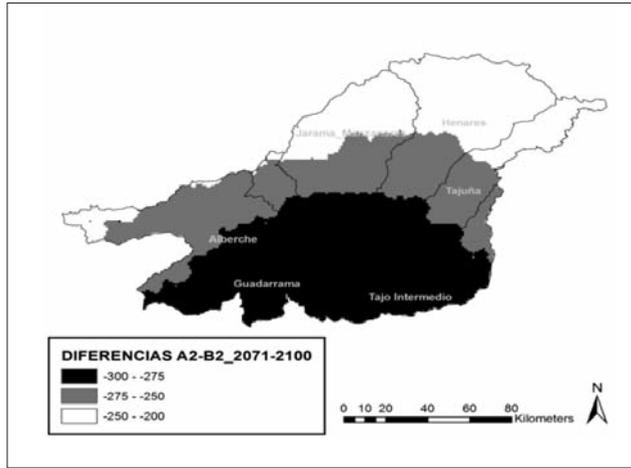


Fig. 10. Diferencias entre la situación actual y el escenario B2.

Por último, el análisis comparativo de las disponibilidades hídricas en las dos hipótesis de trabajo para el último tercio del presente siglo arroja como conclusión más importante que la lluvia útil, negativa en

ambos casos, es un 40% inferior en el A2 (-916 mm de lluvia útil) que en el B2 (-654 mm de lluvia útil), situándose la diferencia promedio en -262 mm (Cuadro VIII).

Cuadro VIII. Estadísticos descriptivos de las diferencias de precipitación útil (mm) entre los escenarios A2 y B2 para el horizonte 2071-2100.

Estadísticos descriptivos	Diferencias entre escenarios
Media	-261,9
Desviación Típica	24,6
Máximo	-199,8
Mínimo	-296,9

Desde el punto de vista espacial (Fig. 11) en el 41% del territorio la caída de precipitación útil del escenario B2 al A2 presenta valores superiores a 275 mm; en un 30% éstos oscilan entre 200 y 250 mm y, finalmente, las diferencias más bajas entre los dos escenarios las encontramos en la parte septentrional, englobando al 29% de la superficie.

4. Comparación de la lluvia útil por cuencas hidrográficas

En los dos escenarios (A2 y B2) y en los dos horizontes temporales (2041-2070/2071-2100) las cuencas con un promedio de déficit hídrico más alto serán las del Tajo Intermedio, Guadarrama y Alberche (cuadros IX y X y figuras 12, 13, 14 y 15).

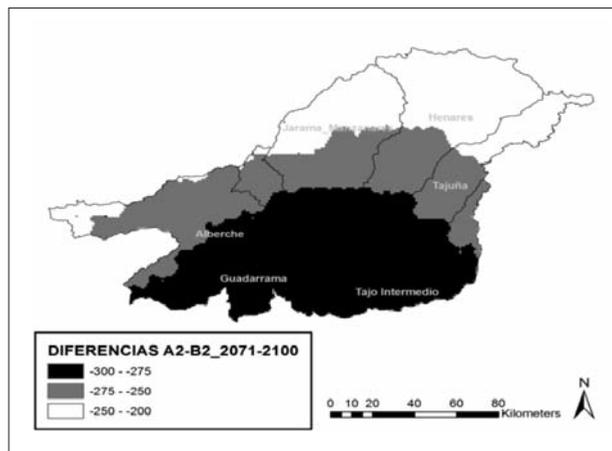


Fig. 11. Diferencias de la lluvia útil entre los escenarios A2 y B2 en el periodo 2071-2100.

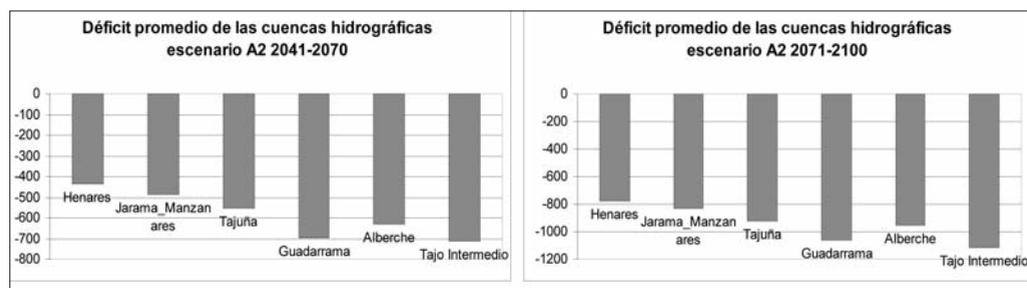


Fig. 12 y 13. Disponibilidades hídricas por cuencas hidrográficas escenario A2 (periodos 2041-2070/2071-2100).

Hay que resaltar que la única cuenca hidrográfica que tendrá algunas zonas con superávit de agua en el escenario B2, será la del Jarama-Manzanares, con unos valores máximos de lluvia útil de 64 mm en el periodo 2041-2070 y de 43 mm en 2071-2100. En el escenario A2, esta misma cuenca registra los valores de déficit más bajos, si los comparamos con los de las restantes cuencas; el déficit alcanza 3 mm en la treintena 2041-2070 y 226 mm en la última treintena del presente siglo. No es de extrañar este comportamiento, ya que en la cuenca alta del Manzanares es donde se producen las mayores aportaciones de precipitación de la Comunidad de Madrid.

La cuenca del Alberche es la que presentará los mayores déficits, fluctuando entre 905 mm y 1284 mm en las treintenas 2041-2070 y 2071-2100, respectivamente, y en el escenario A2, y entre 841 mm y 1002 mm para las mismas treintenas en el escenario B2 (Cuadros IX y X).

La cuenca del Tajo Intermedio está muy castigada por la falta de agua, es la cuenca que tiene una menor amplitud en sus valores de lluvia útil, pero la que tiene un mayor promedio, que oscila en el escenario A2 entre -714 mm en el periodo 2041-2070 y -1117 mm en el periodo 2071-2100, y en el escenario B2 entre -642 y -832 mm en los mismos horizontes temporales.

Cuadro IX. Estadísticos descriptivos de las cuencas hidrográficas (Modelo Had3CM escenario A2).

Cuencas hidrográficas	Periodo 2041-2070				Periodo 2071-2100					
	Valor mínimo	Valor máximo	Amplitud	Media	Desviación Típica	Valor mínimo	Valor máximo	Amplitud	Media	Desviación Típica
Henares	-725	-114	611	-436	152	-1112	-407	705	-775	177
Jarama_Manzanares	-817	-3	814	-487	235	-1226	-226	1000	-832	274
Tajuña	-784	-314	470	-554	125	-1192	-638	554	-925	150
Guadarrama	-880	-162	719	-696	207	-1269	-445	824	-1062	244
Alberche	-905	-104	801	-629	227	-1284	-347	937	-952	267
Tajo Intermedio	-848	-504	344	-714	79	-1255	-869	386	-1117	86

Cuadro X. Estadísticos descriptivos de las cuencas hidrográficas (Modelo Had3CM escenario B2).

Cuencas hidrográficas	Periodo 2041-2070				Periodo 2071-2100					
	Valor mínimo	Valor máximo	Amplitud	Media	Desviación Típica	Valor mínimo	Valor máximo	Amplitud	Media	Desviación Típica
Henares	-655	-61	594	-379	146	-830	-193	637	-538	156
Jarama_Manzanares	-744	-64	808	-421	230	-933	43	977	-573	252
Tajuña	-711	-262	450	-490	118	-901	-420	481	-666	127
Guadarrama	-813	-96	717	-626	206	-982	-199	783	-782	230
Alberche	-841	-35	806	-561	228	-1002	-99	903	-684	254
Tajo Intermedio	-777	-441	336	-642	78	-963	-615	348	-832	78

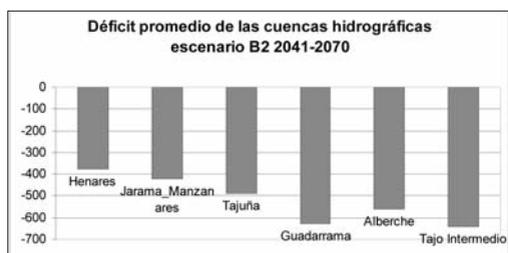


Fig. 14 y 15. Disponibilidades hídricas por cuencas hidrográficas escenario B2 (periodos 2041-2070/2071-2100).

En las figuras 16 y 17 se plasman las medias de los dos horizontes temporales en los dos escenarios de emisiones, A2 y B2.

Consideraciones finales

1. En la actualidad, el promedio regional de precipitación útil, evidencia el déficit

hídrico “estructural”, que en términos generales padece la Comunidad de Madrid y áreas circundantes, no obstante este valor medio enmascara grandes diferencias espaciales entre la zona de la sierra y la zona de los valles; reflejadas en unos valores extremos de precipitación útil que oscilan entre +902 y -451 mm.

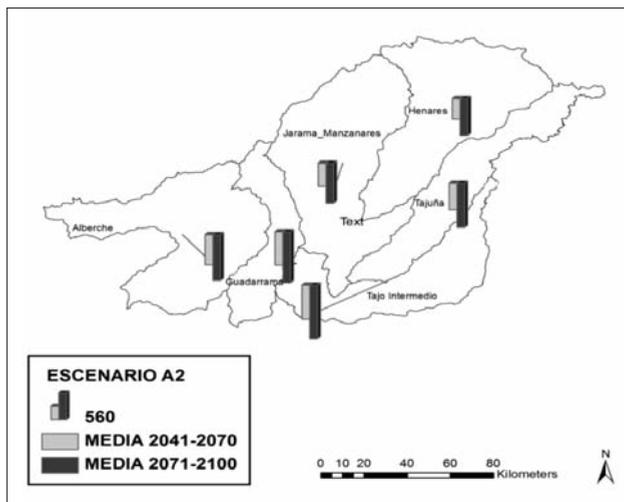


Fig. 16. Disponibilidades hídricas medias de los dos horizontes temporales en el escenario A2.

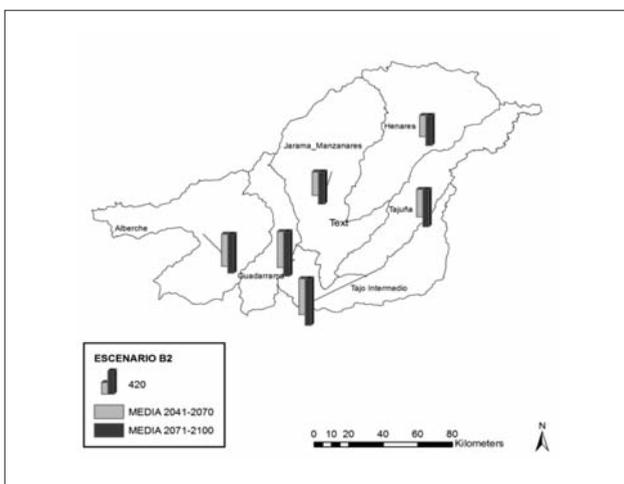


Fig. 17. Disponibilidades hídricas medias de los dos horizontes temporales en el escenario B2.

2. La extensión superficial excedentaria en agua, que en el momento actual representa el 25% del territorio, desaparece por completo en el horizonte 2041-2070, bajo el escenario A2 y, es prácticamente inexistente en el B2 (el porcentaje de territorio con precipitación útil > 0 es insignificante).

3. La evolución temporal futura de la lluvia útil se caracteriza por un progresivo

agravamiento del déficit hídrico, tanto en lo que se refiere a la magnitud del mismo como al porcentaje de territorio afectado. Por ejemplo, el área cubierta por precipitación útil < -200 mm, representa el 53% del territorio en la actualidad; en el horizonte 2041-2070 este porcentaje se eleva hasta 89% y 93% en los escenarios B2 y A2 respectivamente. En el 2071-2100, todo el

territorio registra un déficit de agua superior a los 200 mm en el A2, afectando al 96% del mismo en el B2. La profundización del déficit a lo largo del presente siglo es manifiesta, tal como se refleja en los promedios y valores extremos correspondientes a los distintos períodos temporales. A modo de ejemplo, baste comparar la situación actual con la de finales de siglo: el promedio espacial de la precipitación útil pasa de -133 mm a -916 mm (A2) y a -654 mm (B2). Así pues, el déficit se multiplica casi por siete, en el primer caso, y por cinco en el segundo.

4. Las diferencias entre los dos horizontes temporales en ambos escenarios son siempre negativas, siendo del 63% en el A2 y del 31% en el B2. Su distribución espacial muestra las máximas reducciones en un amplio sector que abarca la parte centro meridional de las distintas cuencas hidrográficas y las mínimas en el Sistema Central.

5. Si comparamos la lluvia útil actual con la proyectada para final de siglo en los dos escenarios de emisiones, habrá una reducción mucho mayor en el escenario A2 (783 mm) que en el escenario B2 (521 mm). Espacialmente las máximas diferencias se localizan en puntos aislados de la cuenca del Alberche y del Sistema Central y las mínimas en algunos sectores de la cuenca del Henares y Manzanares.

6. Las cuencas con déficit hídricos más acusados son las del Tajo Intermedio, Guadarrama y Alberche.

Este trabajo se ha llevado a cabo en el seno del *Grupo Geoclima* de la Universidad Autónoma de Madrid y en el marco del *Proyecto Programa de desarrollo territorial y gestión del agua en la Comunidad de Madrid* (S2007/HUM-0474).

Bibliografía

ALCOLEA MORATILLA, M. A. y GARCÍA ALVARADO, J. M. (2006): «El Agua en la Comunidad de Madrid». *Observatorio Medioambiental*, nº 9, pp. 63-96.

AYALA-CARCEDO F. J. y IGLESIAS LÓPEZ, A. (2001): *Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, el diseño y la planificación hidrológica en España peninsular*. Instituto Tecnológico y Geominero de España.

BRUNET, M. *et al.* (2007): «Temporal and spatial temperature variability and change over Spain during 1850-2005». *Journal of Geophysical Research* nº, vol. 112.

CAÑADA TORRECILLA, R. (2007): «Análisis Geoestadístico». En MORENO, A. (ed.): *Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Manual de Autoaprendizaje con ArcGIS*. 2ª edición, Ra-Ma, pp. 753-880.

CAÑADA TORRECILLA, R. (2007): «El cambio climático: impactos y opciones de mitigación». En LAMELA, A. LAMELA, A. (dir.): *Estrategias para la Tierra y el Espacio: Geoísmo y Cosmoísmo*, T.II, Madrid, Espasa Calpe, pp. 15-120.

CAÑADA, R. *et al.* (2001): «Análisis de las tendencias de las temperaturas máximas y mínimas medias anuales en la meseta sur española durante el siglo XX». En PÉREZ, A., LÓPEZ, E. y TAMAYO (eds.): *El tiempo del clima*. AEC, serie A, nº 2, 53-63.

CASTRO, M., MARTIN VIDE, J. y ALONSO, S. (2005): «El clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI». En MORENO, J. M. (dir/coord.): *Evaluación preliminar general de los impactos en España por efecto del Cambio Climático*, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

CEDEX (1998): *Estudio sobre el impacto potencial del cambio climático en los recursos hídricos y demandas de agua*

de riego en determinadas regiones de España. Madrid, Informe técnico para el Ministerio de Medio Ambiente.

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL TAJO. *Descripción general de la cuenca*. Accesible en la dirección: <http://www.chtajo.es/>

FERNANDEZ GARCIA, F. (1975): «El clima de la provincia de Madrid». *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*, Madrid, pp. 65-95.

FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (2005): «Creación de nuevos mapas a partir del MDE. Aplicación de las uncciones de análisis de superficies». En MORENO, A. (ed.): *Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Manual de Autoaprendizaje con ArcGIS*. 1ª edición, Ra-Ma, pp. 623-642.

FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (2007): «Cambios observados en el clima. Evidencias del fenómeno». En Ministerio de Medio Ambiente: *Informe del Cambio Climático en España. Estado de Situación*. OCC, Ministerio de Medio Ambiente.

FERNÁNDEZ, F. y GALÁN GALLEGO, E. (1993): «La precipitación en el valle del Tiétar: aspectos metodológicos». Homenaje al Prof. Albentosa, pp. 91-111.

FERNÁNDEZ, F. *et al.* (1996): «Delimitación espacial de la precipitación útil en la Comunidad de Madrid mediante la utilización de un sistema de información geográfica». En MARZOL, M. V., DORTA, P. y VALLADARES, P. (Edseds.): *Clima y agua. La gestión de un recurso escaso*. MEC y Gob. Canarias, 311-324.

GALÁN GALLEGO, E. (1981): «El clima de la provincia de Toledo y suroeste de Ávila». *Estudios Geográficos*, Madrid, nº 162, pp. 19-49.

GALÁN GALLEGO, E. (2004): «Sequías climáticas en la Meseta Meridional». En *Historia, Clima y Paisaje*. Estudios geográficos en memoria al profesor Antonio López Gómez. Universidades de Valencia, Autónoma de Madrid y Alicante.

GALÁN, E. *et al.* (1999): «Evolución de las precipitaciones anuales en la Meseta meridional durante el siglo XX». En RASO, J. M. Y MARTÍN VIDE., J. (eds.): *La climatología española en los albores del siglo XXI*. AEC, serie A, nº 1, 169-180.

GALÁN, E. *et al.* (2001): «Annual temperature evolution in Southern Plateau of Spain from the construction of Regional Times Series». En BRUNET, M. y LÓPEZ, D. (Edseds): *Detecting and Modelling Regional Climate Change*. Berlín, Springer, pp. 119-131.

INSTITUTO DE ESTADÍSTICA (2009): *Anuario Estadístico de la Comunidad de Madrid. 1985-2009*. Madrid, Dirección General de Economía, Estadística e Innovación Tecnológica. Consejería de Economía y Hacienda. Comunidad de Madrid.

LAMELA, A. *et al.* (2006): «El geoísmo y las directrices mundiales para una mejor gestión del agua». *Nimbus*, nº 17, pp. 91-124.

LAMELA, A. *et al.* (2007): «La utilización sostenible de los recursos hídricos». En LAMELA, A. (dir.): *Estrategias para la Tierra y el Espacio: Geoísmo y Cosmoísmo*, Madrid, Espasa Calpe, pp. 123-187.

McCABE, G. y MARKSTROM, S. (2007): *A Monthly Water-Balance Model Driven by a Graphical User Interface*. Virginia, U.S. Geological Survey, 6 pp.

MITCHELL, T. *et al.* (2004): *A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100)*. Tyndall Centre for Climate Change Research, Working Paper, 55, 30 pp.

MIMAN (2000): *El libro Blanco del Agua en España*. Madrid, Ministerio de Medio Ambiente, 637 pp.

MIMAN (2005): *Evaluación Preliminar General de los Impactos en España por*

Efecto del Cambio Climático. Madrid, 840 pp.

SOLOMON, S., D., QIN, M., MANNING, Z., CHEN, M., MARQUIS, K. B., AVERYT, M., TIGNOR y H .L. MILLE (eds.) (2007): *Climate Change 2007.The*

Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. United Kingdom y New York, 996 pp.